

水路模型実験による透水型ダムの通水特性の評価¹

森井俊広・佐田豊和*・小林孝至**・曾山清十郎

(平成11年11月29日受付)

要約 室内試験および数値計算法にもとづき、ロックフィルを通る流れの水頭損失式を求め、ロックフィル構造物の通水特性を調べた。まず、河川礫を用いた一次元透水試験をおこない、動水こう配と流速の非線形な関係を Forchheimer 式により表した。これにより、ロック材の材料特性と構造物の間隙条件から決定される水理学的平均径をパラメータとして、ロックフィル構造物の水頭損失特性を調べることが可能となった。ここで求めた水頭損失式の妥当性を、室内水路模型実験ならびに有限要素法(FEM)にもとづく数値計算により確認した。構造物を通過する流量、堤体内の流れの状況のいずれも、一次元透水試験によって求めた水頭損失式により良好に推定することができた。小型の模型から実規模大までの規模の異なる透水型ロックフィル堤体を対象に、水位流量曲線の特徴を調べた。堤体を通過する流量が水位とともに累乗的に増大すること、またこの水位流量関係に対し水温の影響はまったくなく、これを水理学的な設計因子として考慮する必要がないことを示した。これらの水位流量曲線に対し、有効動水こう配を導入することにより、堤体の規模に依存しない統一的な水位流量曲線をえることができた。

キーワード：ロックフィル、水頭損失式、水理学的平均径、室内水路模型実験、FEM 数値計算

はじめに

礫や碎石で代表されるロック材料は、フィルダムの透水性材料やドレーン材料として、あるいは河川の護岸工や水制工、礫間浄化工など幅広い分野に使われている。海外では、集中的な降雨を一時的に貯水して洪水のピーク流量を緩和したり、あるいは地下水への涵養を促進して水資源の確保をはかる目的で、ロック材料のみからなる透水型ダムが建設されている (PARKIN, 1990, HANSEN, et al., 1995, HUSSEIN, et al., 1998)。

ロック材料は、遠隔地でも経済的に施工できる点や、重量が大きいため構造物としての安定性を確保しやすいなどの利点をもつ。そして、何よりも、排水性あるいは通水性がよく、しかも大きなエネルギー損失をもたらすことができる。このような理由で、ロックフィルとして水利構造物に用いられることが多い。ロックフィル構造物を通る流れは非線形となる。これは、水頭損失が流速の非線形な関数になるということであるが、それ以上に特徴的なのは、ダルシー流れに比べた場合の圧倒的な流量の多さである。このためロックフィル構造物の水理学的設計では、まずその水頭損失特性を調べ、これにもとづいて構造物を通る流量を推定することが重要となってくる。

本論文では、室内試験および数値計算法にもとづき、ロック材を通る流れの水頭損失式を求め、ロックフィル構造物の通水特性を調べる。具体的には、次章で、河川礫を用いた一次元透水試験をおこない、ロックフィルの水頭損失特性、つまり動水こう配と流速との非線形関係を調べる。水頭損失式として Forchheimer 式を用いる。流れに及ぼす粒子の大きさや形状、間隙の幾何構造等の影響を記述できる水理学的平均径 (Hydraulic mean radius)ならびに水温を、パラメータとして導入する。次いで、室内水路を利用した模型堤体実験をおこない、その測定結果にもとづき、水頭損失式の適用性を検討する。検討にあたって、有限要素法(FEM)にもとづく非線形数値計算法を用い、ロックフィル構造物を通過する流量や流れの状況を分析する。ここで展開した水頭損失式は、水理学的平均径を唯一の設計パラメータとして、小規模な模型程度の構造物から実規模の構造物まで、一貫して、その流れの状況を評価できるという特徴をもつ。最後に、この水理学的平均径をパラメー

¹本原稿は、農業土木学会平成11年度応用水理研究部会研究集会で発表した「ロックフィル構造物を通る流れの水頭損失特性と水位流量曲線」(森井俊広・佐田豊和・立石卓彦)に、その後実施した室内実験結果を含め、加筆したものである。

*新潟大学大学院自然科学研究科

**農林水産省関東農政局霞ヶ浦用水農業水利事務所

表1 試験に用いた礫材の性質と粒径区分

区分名	粒径 mm	代表粒径 d , mm	形状係数 r	比重
D 1	20-25	22.5	1.931	2.563
D 2	15-20	17.5	1.860	2.550
D 3	10-15	12.5	1.877	2.557
D 4	5-10	7.5	1.894	2.575

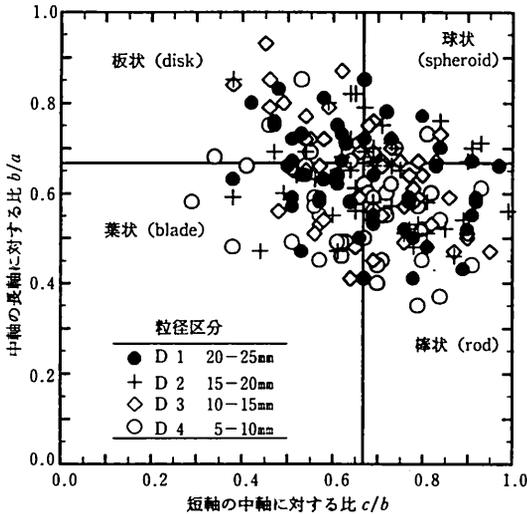


図1 実験に用いた礫の粒形を示す Zingg 分類図

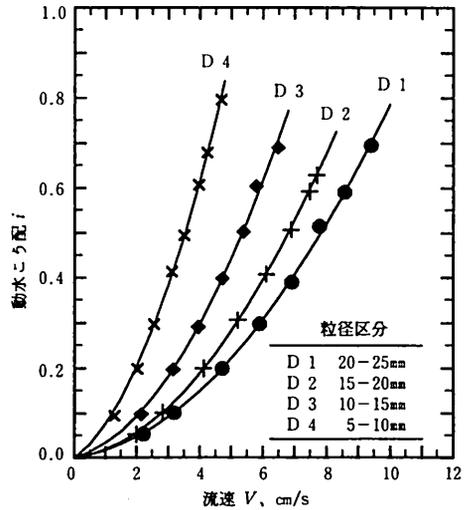


図2 河川礫を用いた一次元透水試験の結果の一例(実線は Forchheimer 式による回帰線)

タにして、小規模な模型程度の構造物から実規模の構造物までの水位流量曲線を比較する。構造物の規模が変わると、当然、通過する流量も違ってくる。これらを、HANSEN, et al. (1995) が提案する有効動水こう配の概念を導入して整理すると、構造物の規模にかかわらず、共通した水位流量曲線がえられ、簡易な設計式の提案が可能となる。

一次元透水試験による水頭損失式

1. 試験方法と材料

試験は、流量が大きいことを除けば、通常の土質材料を用いた一次元透水試験と変わるところはない。内径10cmの亚克力製円筒カラムにロック材を充填したのち、給水タンクより定水頭状態でカラムの下端から上端に向けて通水し、流量を測定した。カラムの長さは100cm程度とし、供試体の容積と質量をはかり、別途に測定した礫の含水比と比重を用いて、供試体の間隙比 e を求めた。流量流速 V は、流量をカラムの内径断面積で割って算出した。カラムの壁面に10cm間隔で取り付けられた8本のピエゾメータで全水頭を測定し、カラムの長さ方向に沿った分布こう配から、動水こう配 i を求めた。 i は、0.05から0.8程度まで8段階に変えた。試験開始時と終了時に水温 T を測定した。

試験には河川礫を用いた。礫粒子を洗浄し風乾させたのち、ふるい分けにより、4グループの粒子サイズに分類した。表1に、各粒径グループの粒径区分、代表粒径 d 、形状係数 r および比重をまとめる。 d は、粒径区分の幾何平均とした。粒形の特徴は、図1に示すとおりである。これは、各粒径グループから無作為に取り出した50個の粒子について、それぞれの粒子の長軸の長さ a 、短軸の長さ c 、そして両者に直交する中軸の長さ

b を測定し、Zingg 図 (GARGA, et al., 1991) の形でまとめたものである。図 1 より、実験に用いた礫では、相対的に葉状および棒状の粒子形状が多く、球状の粒子が少なくなっている。表 1 の r は、SABIN and HANSEN (1994) が板状、葉状、棒状および球状の粒形をもつ粒子に対して求めた形状係数を、図 1 の各粒形粒子の出現頻度で重みを付けて算出した平均値である。

2. 試験結果

試験結果の一例を図 2 に示す。粒径区分に関わらず、動水こう配と流量流速との間に非線形な関係があること、また土質材料を通るダルシー則にしたがう流れに比べ、非常に多くの流量が生じているのがわかる。

3. 水頭損失式

図 2 の動水こう配と流量流速との関係は、次の Forchheimer 式によって精度よく記述できる。

$$i = A \cdot V + B \cdot V^2 \quad (1)$$

ここで A 、 B は流体の性質と間隙構造によって決まる係数で、それぞれ $[T^1L^{-1}]$ 、 $[T^2L^{-2}]$ の次元をもつ。係数 A 、 B は具体的には、図 2 に示す測定データを回帰することによって決定できる。同図の曲線は、式(1)による回帰線を描いたもので、適合度は非常に良好である。

式(1)に示した Forchheimer 式は、粘性流体の運動方程式である Navier-Stokes 式にもとづいて理論的に誘導できる (IRMAY, 1958, 吉田, 1968, SCHEIDEGGER, 1974)。これらによると、式(1)の係数 A は間隙の幾何構造と流体の性質の両者から、また係数 B は間隙の幾何構造のみから影響を受け、次のようなモデル構造をもつ。

$$i = \frac{A_0 \nu}{g} V + \frac{B_0}{g} V^2 \quad (2)$$

ここで ν は水の動粘性係数、 g は重力加速度である。また、 A_0 および B_0 は、流体の性質とは独立に間隙の幾何構造のみに依存する定数で、それぞれ $[L^{-2}]$ および $[L^{-1}]$ の次元をもつ。 A_0 の逆数は、ダルシー則で定義される物理的透水係数に相当する (吉田, 1968)。式(1)と(2)の対比から、係数 A_0 、 B_0 は、一次元透水試験結果の回帰分析からえられる A 、 B と次の関係をもつ。

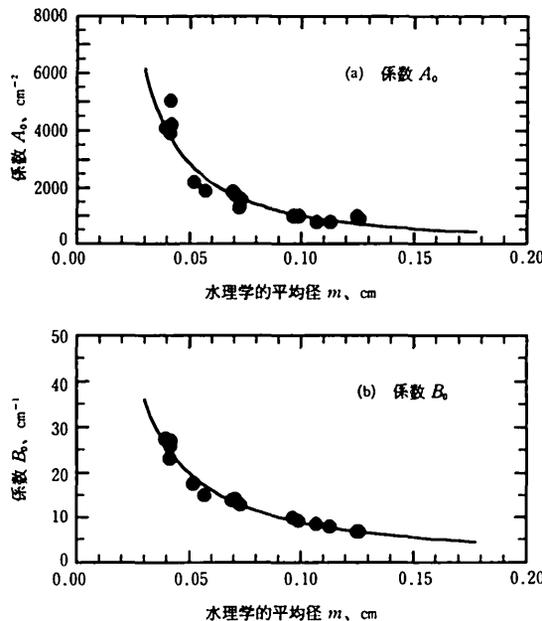


図 3 礫の一次元透水試験から求めた非線形係数 A_0 、 B_0 と水理学的平均径との関係

$$A = \frac{A_0 \nu}{g} \quad (3a)$$

$$B = \frac{B_0}{g} \quad (3b)$$

ロックフィル材を通る流れは、粒子の大きさや形状、あるいは構造体としての間隙の大きさや分布などに影響される。このような影響を記述するのが、前章で述べた水理学的平均径 m である。したがって、式(2)の係数 A_0 、 B_0 は、 m に強く依存するはずである。図3は、このような観点から、係数 A_0 、 B_0 と m の関係をまとめたものである。ここで、 m は、SABIN and HANSEN (1994) の定義にしたがい、次式によって算出した。

$$m = \frac{e \cdot b}{6 \cdot r} \quad (4)$$

ここで b は先に説明したロック材粒子の中軸の長さであり、ここでは、表1に示し d をあてている。

図3より、係数 A_0 、 B_0 と m の間には強い一価的な関係があるのがわかる。この関係の関数形を決定する明確な根拠はないが、SCHEIDEGGER (1974) の理論誘導式や Kozeny and Caman の提案式 (BEAR and VERRUIJT, 1987) を参考にすると、累乗式タイプが適する。図3に示した曲線は、このような累乗式により求めた回帰線で、次のように算出される。

$$A_0 = 31.815 \cdot m^{-1.5011} \quad (5a)$$

$$B_0 = 0.6282 \cdot m^{-1.1547} \quad (5b)$$

ここで A_0 、 B_0 および m の単位はそれぞれ cm^{-2} 、 cm^{-1} および cm である。ロックフィル構造物の m が既知であれば、式(5)により係数 A_0 、 B_0 を、さらに式(3)からは、 ν を介して、所定の水温における係数 A 、 B を決定できるから、式(1)を用いて、構造物の水頭損失特性を評価することが可能となる。

水路模型実験による水頭損失式の適用性の検討

1. 水路模型実験の概要

室内水路を利用した模型実験により、前章で求めた水頭損失式の適用性をさぐる。

模型実験は、図4に示すように、水平に設置した長さ350cm、高さ40cm、幅20cmのアクリル製水路で実施した。ロック材をできるだけ均一になるように突き固め、ダム断面状の模型堤体を作製した。模型堤体の高さ H はおおよそ30cm程度とした。堤体を作製したのち、左岸側、中央、右岸側の断面で堤体の寸法を測って堤体積を求め、これと投入材料の質量、含水比、比重から e を算出した。水道ホースで水路上流端に水を供給し、上流側水位 h_u をおおよそ10cmから30cmあたりまで、4段階から6段階に変えた。下流側は自由流下条件とした。各水位段階で堤体を通る流れが定常状態になったのを確認したのち、水路単位幅あたりの流量 q と堤体内の全水頭分布 ϕ を測定した。 q は、水路の下流水端において容器で集水した水量の質量を測り、これを集水時間と水路幅で割って算出した。 h_u および ϕ は、水路の底面と片側壁面に取り付けたピエゾメータから読みとった。

実験には、一次元透水試験と同じ河川礫を用いた。表2に、実験シリーズとケース名、実験条件、ならびに実験時に測定した堤体の水理学的平均径と水温をまとめる。第1および2シリーズでは、先の表1に示したD1からD4の粒径区分の材料を用い、上下流斜面のこう配を、それぞれ、1:1および1:2とした計9ケースの実験をおこなった。ここで、第1シリーズでは、D1にD3を混合した材料を用いたケースも加えている。いずれのシリーズも、堤頂幅 TW は $H/3$ とした。第3シリーズでは、粒径区分D1とD3を用い、上下流斜面のこう配を1:1、 TW を堤体の高さと同じ H とした2ケースを実施した。第4シリーズは、 $TB = 2H$ で側面が鉛直の矩形断面状の堤体を対象にした実験で、粒径区分D1とD3の2ケースについて実施した。

2. FEMによる水路模型実験結果の分析

前章で求めた水頭損失式の特徴は、ロックフィル構造物の間隙の幾何学的特性を表す水理学的平均径をキーパラメータとして、任意の水温条件下における非線形流れを評価できる点にある。この特徴を確認するため、前章で求めた水頭損失式を用いた数値計算により、堤体を通る流量および堤体内の全水頭分布を推定し、これ

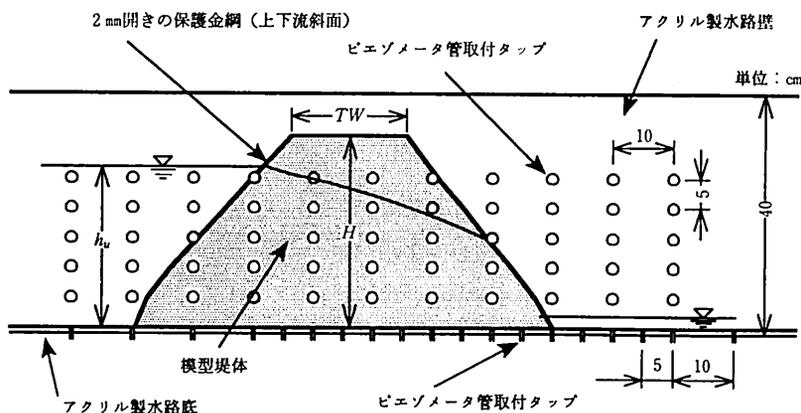


図4 室内水路模型実験の装置概要

表2 室内水路模型実験のシリーズ、ケース、実験条件ならびに水理学的平均径と水温

シリーズ	ケース	粒径区分	代表粒径 d , cm	斜面こう配	堤体高さ H , cm	堤頂幅 TW	水理学的平均径 m , cm	実験時水温 T , °C
1	D 1-11-10	D 1	2.25	1V : 1H	30	$H/3$	0.117	8.7
	D 2-11-10	D 2	1.75	1V : 1H	30	$H/3$	0.096	11.4
	D 3-11-10	D 3	1.25	1V : 1H	30	$H/3$	0.071	8.3
	D 4-11-10	D 4	0.75	1V : 1H	30	$H/3$	0.043	8.0
	D13-11-10	D1+D3	1.67	1V : 1H	30	$H/3$	0.080	8.6
2	D 1-12-10	D 1	2.25	1V : 2H	30	$H/3$	0.112	24.2
	D 2-12-10	D 2	1.75	1V : 2H	30	$H/3$	0.095	13.7
	D 3-12-10	D 3	1.25	1V : 2H	30	$H/3$	0.067	13.7
	D 4-12-10	D 4	0.75	1V : 2H	30	$H/3$	0.041	20.9
3	D 1-11-30	D 1	2.25	1V : 1H	30	H	0.103	19.8
	D 3-11-30	D 3	1.25	1V : 1H	30	H	0.063	19.3
4	D 1-V-60	D 1	2.25	Vertical	30	$2H$	0.099	14.7
	D 3-V-60	D 3	1.25	Vertical	30	$2H$	0.060	24.2

を水路模型実験の結果と比較する。

数値計算法はFEMにより定式化した。離散化には、4個のCSTよりなる四辺形要素(デサイおよびアーベル、1974)を使用した。先の式(1)で示した動水こう配と流速との間の非線形な関係は、逐次近似法(KAZDA, 1990)にもとづく繰り返し計算により確定するようにした。数値計算に用いた係数 A 、 B は、表2の m および T からえられる動粘性係数を用いて、式(5)と式(3)より算出した。

図5に、水路模型実験とFEM数値計算によりえられた q を比較する。実験ケースごとにやや傾向的な偏りがみられるものの、おおむね良好に対応しており、しかも、流量が低いレベルから高いレベルまで同程度の誤差のばらつきを示している。

図6は、シリーズ1の粒径区分D1を用いた実験で、上流側水位を最も高くした場合の全水頭分布について、実験結果と数値計算結果を比較したものである。これについても非常に良好な対応をみることができる。同図には、参考に、数値計算でえられた要素網を細線で示している。

以上により、前章でモデル化した水頭損失式は、ロックフィル構造物の非線形流れの評価に十分な適用性を

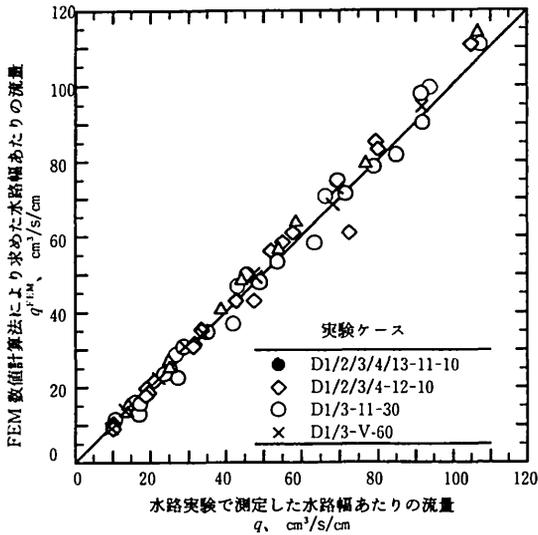


図5 水路単位幅あたりの流量についての水路実験結果とFEM計算値との比較

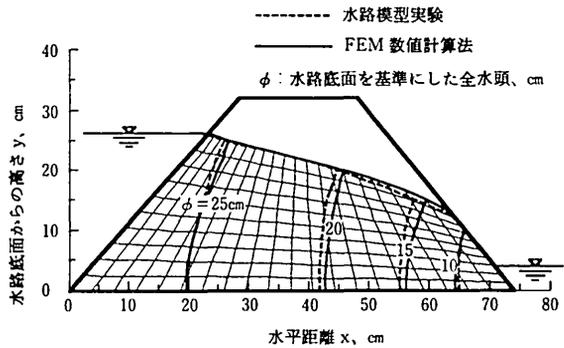


図6 水路模型実験D1で測定した自由水面および全水頭分布とFEM数値計算結果との比較

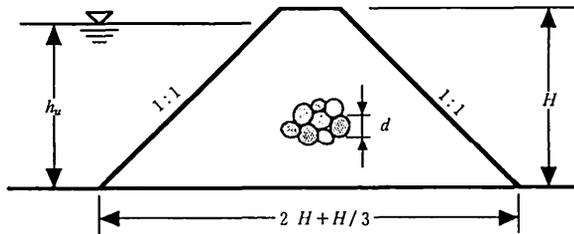


図7 規模の異なる堤体の断面形状

表3 規模の異なる堤体の設定条件

ケース	堤高 H , m	代表粒径 d , cm	水理学的 平均径 m , cm	水温 T , °C
DS	0.3	2.25	0.12	10, 30
DM	5.0	37.5	2.0	10, 30
DL	10.0	75.0	4.0	10, 30

もつと判断できる。

ロックフィル構造物の水位流量曲線

1. 規模の異なる構造物の水位流量曲線

ロックフィル構造物における流れで最も重要なのは、通過する流量をいかに精度よく推定するかという点である。この種の流れは、先に述べたように、ダルシー則にしたがう流れに比した場合の圧倒的な流量の多さで特徴づけられる。ここでは、前章第2節のFEM計算法を用いた数値実験により、模型規模から実規模レベルまでを想定した透水型ダム水位流量曲線を調べる。

堤体は、図7に示すように、1:1傾斜の上下流斜面をもつ高さ H 、堤頂幅 $H/3$ の台形状断面とする。基礎地盤は土質材料を考え、実質的に不透水性とみなす。水位流量曲線を算定するにあたり、 h_w は、 $0.2H$ から H

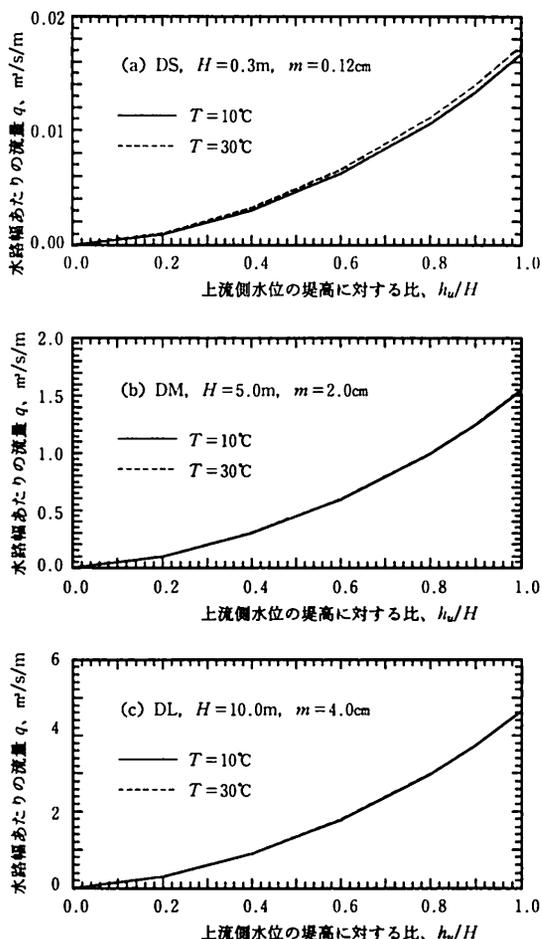


図8 FEM 数値計算により求めた規模の異なるロックフィル堤体の水位流量曲線

まで段階的に変えた。堤体の下流側では水がただちに流下するとして、水位はないとした。数値実験には、模型規模の $H=0.3\text{m}$ と実規模大の 5m および 10m の 3 ケースを設定した。表 3 に、各実験ケースの条件を示す。模型規模のケース DS は、先の表 2 に示したシリーズ 1 の粒径区分 D 1 の礫を用いた模型実験を想定したもので、実験結果にもとづき $m=0.12\text{cm}$ に設定した。堤体の d は H に比例して大きくなると仮定した。したがって、ロック材の粒形が同じであれば、粒径にかかわらず間隙比は同じになるから、先の式 (4) から明らかのように、 m は d あるいは H とともに比例して大きくしている。

図 8 に、数値実験によりえられた、 $T=10^\circ\text{C}$ および 30°C における各堤体の水位流量曲線を比較する。横軸には上流側水位を堤体の高さで割った h_u/H を、縦軸には単位奥行きあたりの流量 q をとっている。図 8 より、流量は堤体の規模、つまり水理学的平均径が大きくなると、それに対応して増大し、さらに、上流側水位とともに累乗的に増えていくのがわかる。このような水位流量曲線に対する水温の影響をみると、ケース DS のように模型程度の小さな規模でもわずかであり、ケース DM や DL などの実規模レベルの大きさの堤体になると、水温の影響は実質的にないのがわかる。このことは、透水型ダムなどのロックフィル構造物の水理学的設計をおこなう場合、通過流量に及ぼす水温の影響を設計因子として取り込む必要がないことを意味する。

2. 有効動水こう配にもとづく設計式

透水型ダムなどのロックフィル構造物の水理学的設計では、水位流量曲線が重要な役割をもつ。

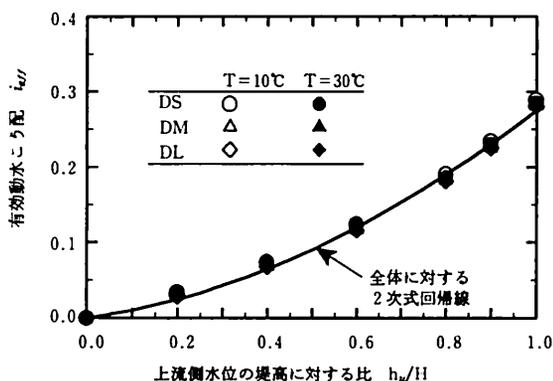


図9 有効動水こう配を用いてまとめた規模の異なるロックフィル堤体の水位流量関係(いずれもFEM計算による)

ロックフィル構造物の上流側に水位が負荷されると、それによって構造物内部に局所的な動水こう配が生じ、たとえば、先の図6のような流れが生じる。そして、この局所的に生じた流れが合わさって、水路実験で測定された流量をもつ流れが形成される。したがって、全体からみた流れをもたらず動水こう配があるはずであり、これらは、構造物内部の局所的な動水こう配を合わせたものと等価な効果をもつことになる。局所的な動水こう配をあわせたものと等価な効果をもつ全体の動水こう配を、HANSEN, et al. (1995) は、有効動水こう配 i_{eff} とよび、これを、構造物を通過する平均的な流速 \bar{V} を水頭損失式にあてはめてえられる動水こう配で定義した。この定義にしたがうと、ここでは Forchheimer 式を用いているから、 i_{eff} は次のように与えられる。

$$i_{eff} = A \cdot \bar{V} + B \cdot \bar{V}^2 \quad (6)$$

式(6)を用いるにあたって、構造物の平均流速 \bar{V} をどのように定めるかが問題となる。ここでは、 \bar{V} を上流側水位より下面の鉛直断面における水平流れの流速と考える。したがって単位幅あたりでは、 \bar{V} は q/h_u として算出できる。

図9は、図8の水位流量曲線を i_{eff} を用いてまとめなおしたものである。横軸には図8と同じく h_u/H を、縦軸には i_{eff} をとっている。式(6)と \bar{V} の定義から明らかなように、 i_{eff} は、間接的に構造物を通過する流量を与える指標と考えることができる。図9は、 i_{eff} を用いることにより、堤体の規模に関係なく、統一された水位流量曲線がえられることを示している。このことから、HANSEN, et al. (1995) の指向する、ロックフィル構造物の水位流量曲線に関する簡易な設計式が十分に現実的なものであることがわかる。ただし、図9は、まだ構造物の断面形状の効果を十分に反映していないため、今後、たとえば、堤体斜面の傾斜や堤長幅などを変えた堤体断面に対して、検討を加えていく必要がある。

まとめ

室内試験および数値計算法にもとづき、ロックフィルを通る流れの水頭損失式を求め、ロックフィル構造物の通水性能を調べた。まず、河川礫を用いた一次元透水試験にもとづき、動水こう配と流速の非線形な関係を Forchheimer 式により表した。これによりえられた水頭損失式では、水温の影響を、水の動粘性係数を介して適切に考慮することができる。また、水頭損失式を記述する非線形係数を水理学的平均径の関数としてモデル化した。これにより、ロック材の材料特性と構造物の間隙条件から決定される水理学的平均径を唯一のパラメータとして、ロックフィル構造物の水頭損失特性を調べることが可能となった。ここで求めた水頭損失式の妥当性を、室内水路模型実験ならびに FEM にもとづく数値計算により確認した。構造物を通過する流量、堤体内の流れの状況のいずれも、一次元透水試験によって求めた水頭損失式により良好に推定することができた。小型の模型から実規模大までの規模の異なる透水型ダムを対象に、水位流量曲線の特徴を調べた。堤体を通過する

流量が水位とともに累乗的に増大すること、またこの水位流量関係に対し水温の影響はまったくなく、これを水理学的な設計因子として考慮する必要がないことを示した。これらの水位流量曲線に対し、有効動水こう配を導入することにより、堤体の規模に依存しない統一的な水位流量曲線をえることができた。これにより、堤体の規模や形状を取り込んだ簡易な流量推定式の作成が可能であることを指摘した。

本研究を進めるにあたり、一部で、文部省科学研究費による補助（課題番号11660238）を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- BEAR, J. and VERRUIJT, A. 1987. *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, D. Reidel Publishing. pp. 41-43.
- デサイ C.S.,アーベル, J.F.著／山本善之訳. 1974. マトリックス有限要素法－基礎理論とその応用－, 科学技術出版社. pp. 497-527.
- GARGA, V. K., TOWNSEND, R. and HANSEN, D. 1991. A method for determining the surface area of quarried rocks. *Geotechnical Testing Journal*, 14 (1) : 35-45.
- HANSEN, D., GARGA, V. K. and TOWNSEND, R. 1995. Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 32 : 223-232.
- HUSSEIN, A. K., MORII, T. and HATTORI, K. 1998. Determination of discharge flow through rockfill gabion weir. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 195 : 123-131
- IRMAV, S. 1958. On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas. *Transactions, American Geophysical Union*, 39 (4) : 702-707.
- KAZDA, I. 1990. *Finite Element Techniques in Groundwater Flow Studies: With Applications in Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Elsevier Science. pp. 164-183.
- PARKIN, A. K. 1990. Through and overflow rockfill dams. pp. 571-592 in Maranha das NEVES (ed.) *Advances in Rockfill Structures*, Kluwer Academic Publishers.
- SABIN, C. W. and HANSEN, D. 1994. The effects of particle shape and surface roughness on the hydraulic mean radius of a porous medium consisting of quarried rock, *Geotechnical Testing Journal*, 17 (1) : 43-49.
- SCHEIDEGGER, A. E. 1974. *The Physics of Flow through Porous Media*, Third edition, University of Toronto Press. pp. 152-170.
- 吉田昭治. 1968. 浸透流の基礎的研究－浸透流の力学－, 山形大学紀要（農学）、5(3) : 27-99

Evaluation of Flow Transmissibility of Flow-through Rockfill Dams based on Laboratory Water Flume Tests

Toshihiro MORII, Toyokazu SADA*,
Takayuki KOBAYASHI** and Seijuro SOYAMA

(Received November 29, 1999)

Summary

The head loss property and the flow transmissibility of the rockfill structures are investigated based on the laboratory tests and the numerical method. River gravel with a particle size of 0.75 to 2.25 cm in diameter is used in the laboratory tests. Firstly the nonlinear relationship between the discharge velocity and the applied hydraulic gradient is determined based on the one-dimensional permeability test. The Forchheimer equation is employed as the head loss equation. The hydraulic mean radius, which represents the effect of rock particle size and shape as well as the voids in the structure on the flow through the rockfill, is effectively introduced into the head loss equation. Secondly the effectiveness of the head loss equation is examined by the laboratory water flume test and the numerical method, where the numerical calculation is formalized based on the finite element method. 13 model embankments with different size of rock particles, slope inclination and top width of the dam section are tested using the acrylic water flume 20 cm wide and 350 cm length. A good agreement of the flow transmissibility between the measurement and the numerical calculation is obtained. Lastly the stage-discharge rating curves of the flow-through rockfill dams are calculated by using the head loss equation determined above and the numerical method. It's found that the flow discharge increases exponentially with the water depth in the upstream reservoir, and that the water temperature does not have any effect on the discharge of the flow through the rockfill structures. The stage-discharge rating curves of the dams with different size can be effectively unified into one curve by introducing the effective hydraulic conductivity of the rockfill structure.

Key words : Rockfill, Head loss equation, Hydraulic mean radius of voids, Laboratory water flume test, FEM numerical calculation

* Graduate School of Science and Technology, Niigata University

** Kanto Regional Agricultural Administration Office, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery